第40卷 第2期
2023年2月

干 旱 区 研 究
ARID ZONE RESEARCH

Vol. 40 No. 2
Feb. 2023

基于情景模拟的流域低碳土地利用格局优化研究
——以汾河流域为例

张恩月[1]， 郑君焱[2]， 苏迎庆[3]， 张 蕾[4]， 张鹏飞[1]， 刘 庚[1]

（1. 太原师范学院地理科学学院，山西 晋中 030619；2. 中晋环境科技有限公司，山西 太原 030000；3. 西北师范大学地理与环境科学学院，甘肃 兰州 730070；4. 太原师范学院经济与管理学院，山西 晋中 030619）

摘 要：开展土地利用优化配置，旨在促进区域土地资源科学利用及实现碳减排目标。本文以汾河流域为研究区，基于2015年、2020年土地利用及阻力因子数据，采用FLUS-MCR模型、碳收支系数法，验证模型精度下，设置2030年低碳发展优先、经济发展优先、耕地保护优先、生态保护优先及自然发展5种模拟情景，对比未来不同情景下土地利用类型的布局特征，并提出优化布局方案。结果表明：（1）2020年汾河流域禁止、限制、重点及优化开发区4类土地利用功能分区面积分别为：2491.76 km^2、6445.99 km^2、16325 km^2、14477 km^2；流域净碳排放量为2002.46×10^4 t，禁止开发区为流域碳汇区，碳吸收总量为0.76×10^4 t，其余三区为碳源区，碳排放总量为2003.22×10^4 t。（2）2030年各情景土地利用碳收支情况由高到低为：低碳发展优先、生态保护优先、耕地保护优先、自然发展、经济发展优先。（3）2030年，不同情景下除禁止开发区用地结构相对合理，限制开发区仍需适当压缩该区耕地及建设用地比例；重点及优化开发区应考虑适当开发宜耕草地，促进流域土地利用生产、生活、生态功能协调发展，实现低碳土地利用目标。

关键词：低碳土地利用；优化配置；FLUS-MCR模型；碳收支系数；汾河流域；山西

全球气候变化是当前人类社会面临的重大危机，为有效应对气候变化带来的威胁，各国呼吁达成以自下而上NDC（Nationally Determined Contributions）目标及行动计划推进全球气候治理[1-2]。中国作为当前世界上碳排放量最大的国家之一，提出"二氧化碳排放力争取于2030年前达到峰值，2060年前实现碳中和"的目标，并且将碳达峰、碳中和作为我国"十四五"规划和2035年远景目标，以此响应全球气候变化的治理[3-4]。如何达成碳达峰、碳中和的目标及具体实现路径已成为当前研究的主要热点[5]。土地利用优化布局通过调整土地利用类型结构及空间布局，维护区域土地资源的高效利用，实现碳排放的减少，有效推动双碳目标的达成[6]。针对土地利用优化布局，研究多偏重于土地数量质量上的分配[7]，基于区域差异的兼顾数量、质量、生态"三位一体"的优化方式已成为新的焦点[8]；研究方法上大多采用线性规划模型[9]、系统动力学模型[10]、CLUE-S模型[11]、多目标粒子群算法[12]等进行分区；研究尺度上包括行政区（省/市/县）[13-14]、城市圈/群[15-16]、生态脆弱区及流域[17-18]等不同层级。总体来看，现有研究大多聚焦土地资源本底的现状优化配置，而兼顾低碳土地利用角度的优化配置研究报道较少。同时，基于现状土地静态的优化配置不足以有效反馈土地利用变化的复杂性、时空异质性及不确定性等特征。相反，采取多情景的土地利用变化模拟及空间优化配置对未来土地利用变化及社会经济发展的不同需求具有更好的弹性适应。

汾河流域是山西省重要的传统能源生产基地及消费源区，也是黄土高原生态脆弱地带。同时具

收稿日期：2022-07-11； **修订日期：**2022-11-21
基金项目：山西省高等学校优秀成果（科学技术）培育项目（2020KJ024）；山西省高等学校科技创新项目（2021L411）；教育部人文社科规划基金项目（19YJAZH066）；山西省人文社科重点研究基地项目（20200133）；太原师范学院研究生教育创新项目（SYYJSYC2222）资助
作者简介：张恩月（1998-），女，硕士研究生，主要从事土地资源评价与开发等研究. E-mail: zsyyy0521@126.com
通讯作者：刘庚. E-mail: liugeng9696@126.com

有流域、矿区及生态敏感等复合环境本底，基于长期的煤铁等工矿开采、耕作及城镇经济建设等人为扰动，造成研究区土地利用结构布局变化的特殊性及复杂性，由此带来的生态环境及土地碳收支问题更为复杂。在国家提出“双碳”目标的背景下，未来流域内社会经济发展的多元性与双碳目标之间的矛盾或将加大，实现双碳背景下土地利用优化配置是解决上述问题的迫切需求。因此，本文集成FLUS-MCR模型，并采用碳收支系数法，基于2015年、2020年土地利用数据，验证模型精度的基础上，设置2030年经济发展优先、耕地保护优先、生态保护优先、低碳目标优先及自然发展5种模拟情景，对比未来不同发展情景下土地利用的布局特征，并提出针对性的优化布局方案，为有效提升区域土地碳汇能力、解决碳收支矛盾，达成“双碳”目标，推进地区开展低碳导向的国土空间规划，制定科学的减排路径提供参考。

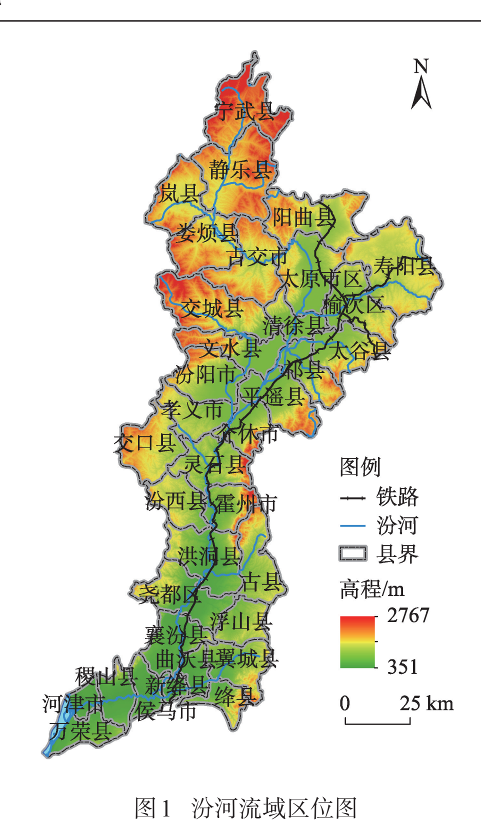


图1 汾河流域区位图

Fig. 1 Location of Fenhe River Basin

1 研究区概况及方法

1.1 研究区概况

汾河流域位于山西省中部，黄土高原东翼（35°13′4″~39°4′4″N、110°26′42″~113°26′56″E）。辖太原、晋中、吕梁等6市约40县，总面积约3.95×10^4 km^2（图1）。属温带大陆性季风气候，年均气温11 ℃，年均降水量392.8 mm。地势由北向南整体倾斜，主要地形为土石质山地、黄土丘陵及河谷盆地等。主要土地利用类型为耕地、草地及林地等。区内人口经济城镇相对集聚，城镇化率达到60.3%，约占山西省40.1%的人口、42.6%的GDP，年均粮食产量约占全省的37%，煤炭产量的26.2%。截至2020年，流域净碳排放量为2002.46×10^4 t，占山西省碳排放总量的35.74%，是本省主要碳源地之一。

1.2 数据来源及处理

2015年、2020年土地利用数据通过波段合成、几何纠正、图像增强等处理，经人机交互式判读解译得到，解译精度为91.1%，按照中国土地利用/土地覆盖数据的3级分类系统重分类为耕地、林地、草地、水域、建设用地、未利用土地等6类。选取9类阻力因子数据均经相应地理处理、裁剪校正、坐标

表1 数据类型及来源

Tab. 1 Data type and source

数据类型	指标	数据来源
基础数据	山西省行政边界	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）2015年
阻力因子	土地利用/覆被	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn）2015年、2020年（Landsat 8 30 m）
	高程/m 坡度/(°)	中国科学院资源环境科学数据中心（http://www.resdc.cn） 2000年山西省DEM（SRTM 30 m）
	土壤厚度/cm	国家地球系统科学数据中心—土壤分中心（http://soil.geodata.cn） 中国高分辨率国家土壤信息格网基本属性数据集（2010—2018）1 km
	植被覆盖度/%	地理空间数据云（www.gscloud.cn） MOD13Q1数据集2020年250 m
	年均气温/℃ 年均降水量/mm	WorldClim version 2.0（http://www.worldclim.org/）2000年
	距道路距离/m 距水体距离/m	国家基础地理信息中心（www.ngcc.cn/ngcc/） 2015年1:1000000中国基础地理信息数据

转化、均匀采样等,采样栅格为1 km×1 km(表1)。

1.3 研究方法

首先基于2020年土地利用数据及省市县发展规划等实际,划定禁止、限制、重点及优化开发区4类土地利用功能分区,并测算各用地类型的碳收支量;然后设置低碳发展优先、生态保护优先、耕地保护优先、自然发展及经济发展优先等5种情景,对各情景土地利用格局进行优化配置;最后对各情景的碳收支量进行横向比较,得出低碳土地利用优化路径(图2)。

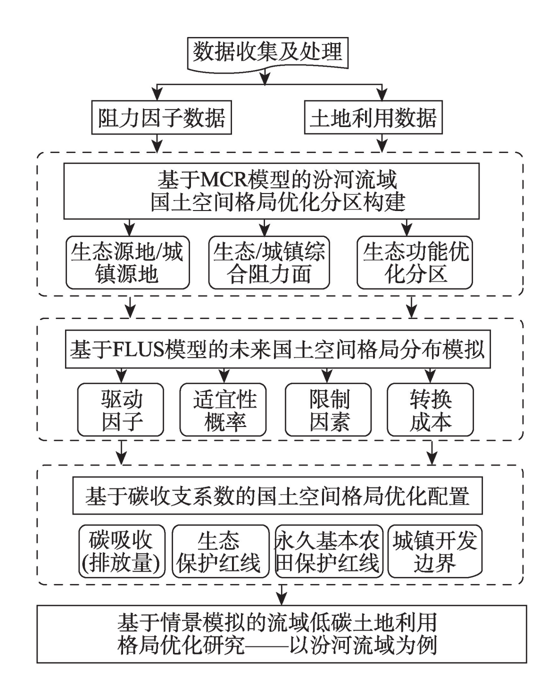


图2　研究框架

Fig. 2　Study framework

1.3.1　土地利用模拟方法　采用FLUS模型模拟未来土地利用格局,该模型是基于传统元胞自动机(CA)模型改良的集成模型[19],其原理是通过融合人工神经网络(BP-ANN)算法,对研究初期土地利用数据及驱动因子计算出各类用地转化的适宜性概率;再结合集成的自适应惯性竞争机制测算模拟年土地利用变化结果的综合概率;最终利用轮盘赌机制得到模拟结果[20-21]。模拟年5种情景及转换原则设置见表2。

1.3.2　土地利用优化分区划定方法

(1)“源”的选取

生态源地是指生态环境质量较高且具有较高生态稳定性及扩展性的区域[22]。考虑多年流域土地利用变化特征,选取生态保护红线内面积始终大于50 km²的林地和始终大于5 km²的水域作为生态源地[23-24](图3a)。城镇源地是指城市集中建设区中城市的核心区[25],提取城镇用地及农村居民点用地为城镇源地(图3b)。

(2)阻力面的构建

选取9类能够反映本研究区现状且具有代表性的阻力因子并赋权[26-27],除土地利用类型因子为中性因子,其余阻力因子的属性对两类源地的作用相反(表3)。以生态/城镇源地为起点分析其向外围扩展的阻力,按阻力值划分为高阻力、较高阻力、中阻力、较低阻力和低阻力区5个等级区(图4)。

(3)最小累积阻力模型

最小累积阻力模型(MCR)是用来测度从“源”地经不同阻力到达目的地所克服阻力的总和[28],依据该原理,设置土地利用功能分区,公式如下:

$$\mathrm{MCR} = f_{\min}\sum_{j=n}^{i=m} D_{ij} \times R_i \tag{1}$$

$$\mathrm{MCR_d} = \mathrm{MCR_e} - \mathrm{MCR_c} \tag{2}$$

式中:$f_{\min}$表示空间上任意点到其他点的最小阻力(最低成本);D_{ij}表示在一定范围内从起点i到j的实

表2　情景类型及转换原则

Tab. 2　Situation types and conversion principles

情景类型	转换原则
低碳发展优先	结合《中国能源统计年鉴》、中国碳核算数据库(https://www.ceads.net.cn/data/)、《山西省统计年鉴》等省市统计年鉴历年研究区能源排放量变化趋势,并参照《山西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》,以最低增长量为目标,优先转换碳汇用地类型林地、水域、草地等
生态保护优先	基于《汾河流域生态修复规划(2015—2030年)》、《汾河流域生态景观规划(2020—2035)》等相关省市国土空间规划基础,纳入生态保护红线区域限制转换,按用地类型生态效益等级依次转换林地、水域、草地、其他
耕地保护优先	通过加入永久基本农田保护区为限制转化区,控制耕地向建设用地转移,除建设用地,加大其他用地类型转换为耕地的概率
自然发展	以2015—2020年土地利用变化速率及基准年驱动因子为源,不考虑政策规划限制,预测各地类未来规模
经济发展优先	基于《山西省国民经济和社会发展第十四个五年规划和2035年远景目标纲要》及历年建设用地等变化趋势,以最大增长量为目标,按低到高等级用地单向转换原则排序:建设用地、耕地、林地、草地、水域等,优先安排建设用地转换

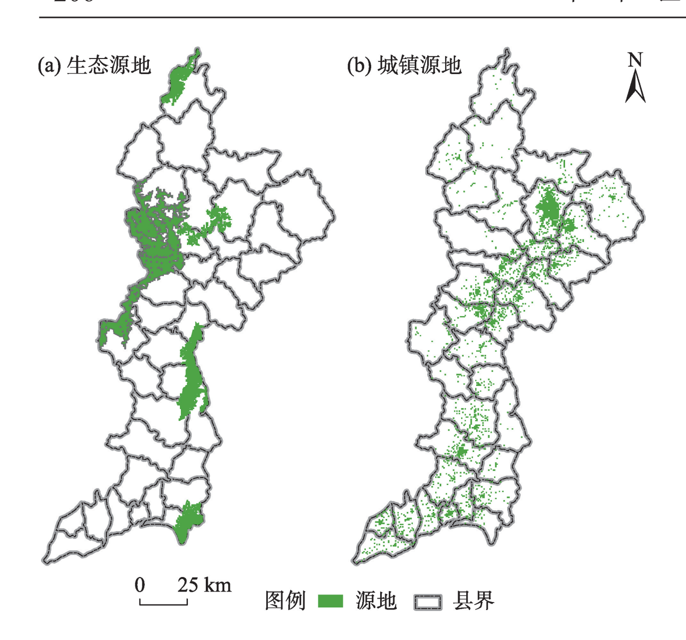


图3 汾河流域生态源地与城镇源地

Fig. 3 Ecological source and town source in Fenhe River Basin

际距离；R_i表示i对目的地的阻力系数；MCR_e表示生态扩张最小累积阻力值；MCR_c表示城镇扩张最小累积阻力值；MCR_d表示两者的差值。

（4）最小累积阻力面计算

按差值的正负可将流域土地利用划分为两类，小于0的部分为生态适宜区，大于0的部分为建设适宜区。为符合流域土地利用实际，进一步细化分区，基于MCR_d差值与面积曲线突变点[29]将适宜经济建设的分区划分为重点及优化开发区，适宜生态保护的分区划分为禁止及限制开发区（图5）。

1.3.3 碳收支系数与碳收支量测算 为测算各土地利用类型的碳排放（吸收）量，通过比对近似区域[30–31]，并结合《中国能源统计年鉴》、中国碳核算数据库（https://www.ceads.net.cn/data/）、《山西省统计年鉴》等省市统计年鉴历年能源排放量推算验证，对不同土地利用类型的碳收支系数分类划定[32]，由于未利用土地占流域面积的比重较小且多年变化较小，碳收支贡献较低，故不作统计（表4）。依据上述原理，碳收支量测算公式如下[33]：

$$C = Si \times Ei \tag{3}$$

式中：C为碳总排放（吸收）量；S_i为第i种土地利用类型的面积；E_i为第i种土地利用类型的碳排放（吸收）系数。其中，正值为碳排放，负值为碳吸收。

2 结果与分析

2.1 汾河流域土地利用现状及功能分区

2020年汾河流域主要土地利用类型为耕地、林地、草地及建设用地，分别占流域面积的40.44%、26.64%、24.03%及8.08%。其中，林地、草地集中于流域边缘山区丘陵，建设用地、耕地集中于流域核心盆地（图6）。根据土地利用功能指向，将流域划分为禁止、限制、重点及优化开发区，生态功能主导的禁止及限制开发区，面积分别为2491.76 km^2、6445.99 km^2，各占流域面积的6.27%和16.22%，其主要位于流域源头及边缘山区等林草地封育区域。生产生活功能为主的重点及优化开发区，面积分别为16325 km^2、14477 km^2，各占流域面积的41.08%和36.43%，其中，重点开发区集中分布在太原、晋中等盆地核心区，优化开发区分布在其外缘。

2.2 汾河流域土地利用碳收支现状

2020年汾河流域净碳排放量为2002.46×10^4 t，占山西省碳排放总量的35.74%，为山西省主要碳源

表3 生态/城镇源地阻力因子分级及权重

Tab. 3 Classification and weight of ecological/urban source resistance factors

阻力因子	阻力因子分级（生态/城镇源地）					权重
	低阻力/高阻力	较低阻力/较高阻力	中等阻力/中等阻力	较高阻力/较低阻力	高阻力/低阻力	
高程/m	＞1600	1200~1600	1000~1200	800~1000	<800	0.1412
坡度/(°)	＞60	45~60	30~45	13~30	＜13	0.1313
土地利用类型	林地、水域	草地	耕地	未利用地	建设用地	0.1540
土壤厚度/cm	＞150	100~150	60~100	40~60	＜40	0.0783
植被覆盖度/%	＞80	60~80	40~60	20~40	0~20	0.1358
年均气温/℃	＜4	4~7	7~9	9~11	＞11	0.0632
年均降水量/mm	＞548	515~548	483~515	447~483	0~447	0.0674
距道路距离/m	＞138	88~138	51~88	17~51	0~17	0.1072
距水体距离/m	0~54	54~114	114~182	182~284	＞284	0.1216

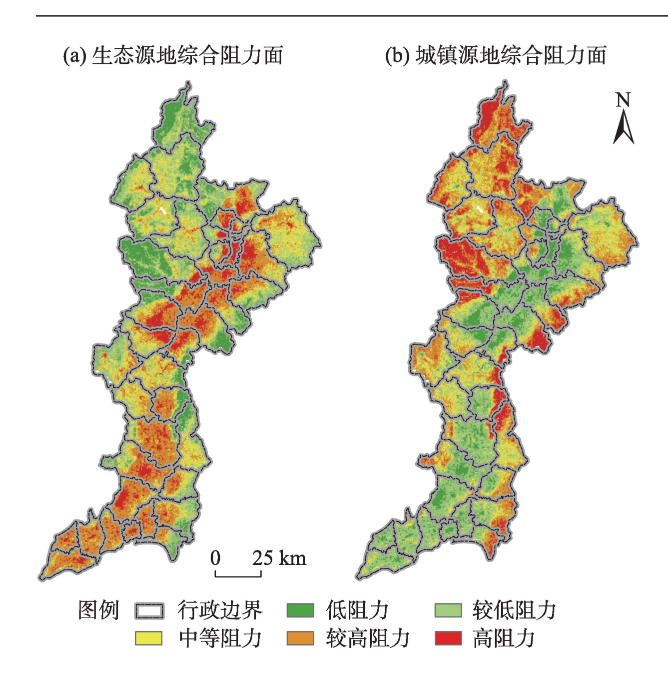


图4 生态/城镇源地综合阻力区

Fig. 4 Ecological/urban comprehensive resistance area

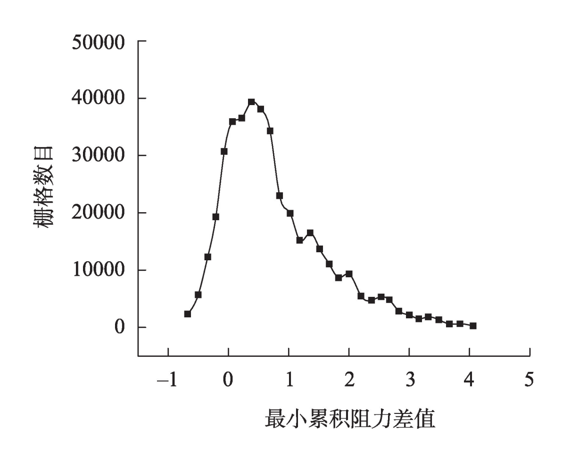


图5 最小累积阻力差值与栅格数目的关系

Fig. 5 Relationship of grid numbers and minimal accumulated margin

表4 土地利用类型的碳收支系数表

Tab. 4 Carbon budget coefficient table of land use types /($t \cdot hm^{-2} \cdot a^{-1}$)

用地类型	碳收支系数	碳效应
耕地	0.37	碳源
林地	−0.49	碳汇
草地	−0.02	碳汇
水域	−0.46	碳汇
建设用地	65.30	碳源

之一(图7)。相比其他流域,太湖流域该年净碳排放量为6304.76×10⁴ t,地均碳排放强度略高于汾河流域[33],但经济发展水平远高于本区,表明汾河流域碳收支相对较差,该结论与朱向梅等[31]得出黄河流域山西省出现碳水赤字且碳生态可持续发展能力弱相一致。因此,需要加强土地利用优化,进一步促进土地利用碳收支现状改善。按功能分区划分,禁止开发区年碳吸收量为0.76×10^4 t,是流域重要的碳汇区,其中林草地面积占该分区的84.07%,有效提高了该区碳吸收能力。其他三区均为碳源区,按当年碳排放量大小排序为:重点开发区、优化开发区及限制开发区,碳排放量分别为1022.69×10^4 t、915.24×10^4 t、65.29×10^4 t。综合来看,各功能分区主要受地形、坡度、交通通达度等多要素影响,导致其主导的土地利用类型存在差异,进而影响到碳源碳汇的占比,造成各功能分区的碳收支能力不同。

2.3 汾河流域多情景土地利用格局优化及碳收支变化

基于2015年土地利用数据模拟2020年、2030年土地利用现状,利用2020年实际土地利用情况进行验证,验证总体精度为0.964,Kappa系数为0.948,表明FLUS模型模拟本研究区土地利用变化的适用性较好。2030年,各情景土地利用优化分区除禁止开发区用地结构相对合理外,其他分区均存在不同程度的土地利用结构问题(图8),具体分析如下。

2.3.1 低碳发展优先 2030年流域碳排放量为2093.62×10^4 t,碳吸收量为52.77×10^4 t,碳收支水平优于其他情景。从各用地类型变化分析来看,该年林地及草地面积较2020年分别增长29.92 km^2、100.09 km^2,碳吸收量提高1666.26 t,而作为碳源的耕地面积比起始年缩减184.25 km^2,使碳排放量减少6817.25 t。各分区中重点及优化开发区主要用地类型面积占比排序相同,其中,重点开发区耕地及建设用地面积占比略超分区总面积的1/2,故适当增加该区生产及生活功能为主的用地类型,促进其经济集聚及规模发展。禁止及限制开发区碳汇的林草地面积占比均较高,其中,禁止开发区林草地面积占比分别达到86.99%、5.04%,限制开发区林草地面积占比共计78.73%,为流域总体碳收支平衡起到重要作用。

2.3.2 生态保护优先 2030年碳排放量为2171.35×10^4 t,碳吸收量为52.95×10^4 t,碳收支水平略低于低碳发展情景。相比2020年,该年林地、草地、水域等生态功能用地共新增196.52 km^2,其中,水域面积增长率达到2.70%,为碳吸收量贡献的0.7%。同期耕

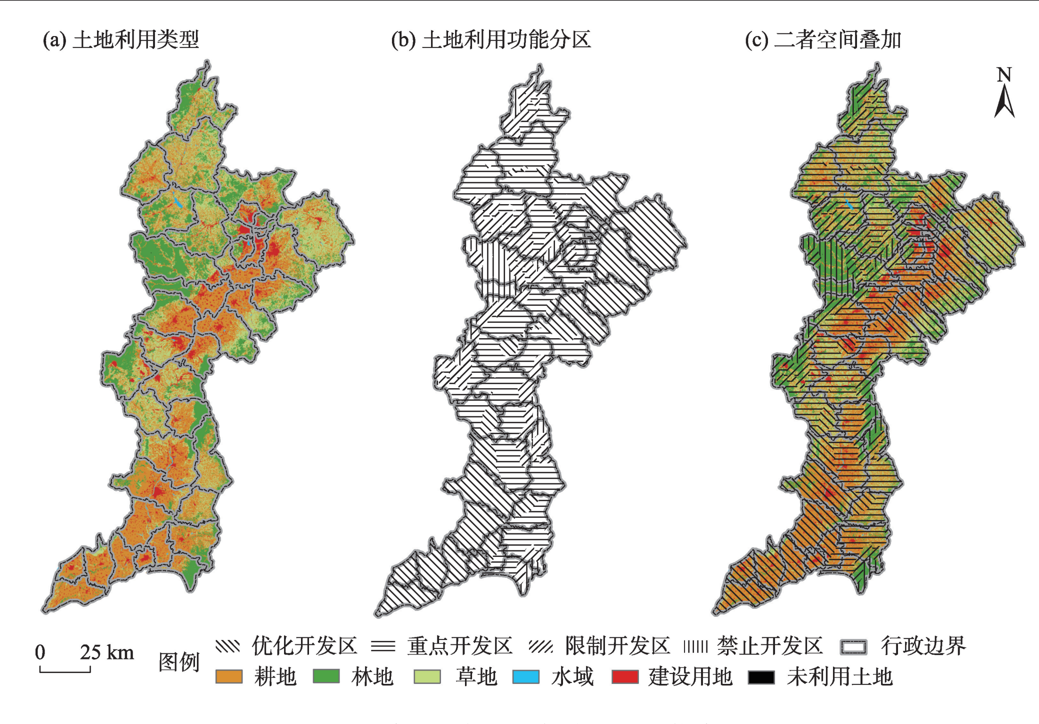


图6 汾河流域土地利用格局及功能分区

Fig. 6 Land use pattern and functional zoning in Fenhe River Basin

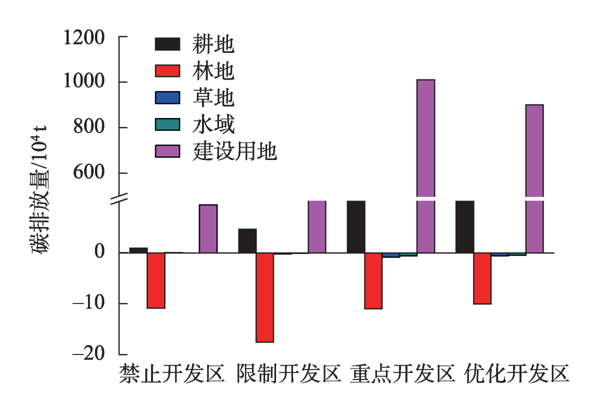


图7 2020年汾河流域土地利用类型碳收支现状

Fig. 7 Carbon balance of land use types in Fenhe River Basin in 2020

地面积缩减376.14 km^2，部分耕地退耕为林草地，使碳吸收量增加3167.07 t，碳排放量减少116.27×10^4 t。各分区中重点及优化开发区林草地面积占比均较高，各自约占该分区面积的2/5，而建设用地仅占各自分区面积的10%左右，因此，该区建设用地等仍需要合理规划，以促进区域城镇化水平提高。禁止及限制开发区，林草地等用地面积约占各分区面积的80%以上，能较好的维持区域生态安全水平。

2.3.3 耕地保护优先 全局层面，该情景碳排放量为2209.38×10^4 t，碳吸收量为25.61×10^4 t。相比2020年，耕地面积增加291.34 km^2，增长率为1.90%，同期草地面积缩减542.64 km^2，建设用地增加234.62 km^2，造成碳排放量增加153.21×10^4 t，碳吸收量下降1085.28 t。草地成为耕地及建设用地的主要转出源，也造成碳排放总量提高。其中，重点开发区耕地与建设用地面积占比总计57.67%，而草地面积高达27.90%，优化开发区耕地与建设用地面积占比之和为64.20%，相较而言，重点开发区经济建设功能指向相对薄弱，因此，通过合理转移宜耕草地等补充区域耕地生产需求，促进区域粮食安全水平的提高。禁止及限制开发区，面积占比最高的用地类型均为林地，其中，限制开发区耕地占比相对较高，该区宜加大退耕力度以平衡区域生态安全水平。

2.3.4 自然发展 2030年流域6种土地利用类型呈现两类变化特征，较研究起始年，耕地、林地及草地面积均呈现缩减态势，面积分别减少169.51 km^2、52.95 km^2、99.55 km^2，建设用地面积则呈现较大增长，规模比前期扩大327.61 km^2，水域及未利用土地变化面积较小，基本维持前期水平。而碳收支情况，流域总体上碳吸收减少了3060 t，碳排放增加了213.31×10^4 t，年碳净排放量为2216.07×10^4 t。其中，重点开发区耕地及建设用地面积之和占该分区的56.19%，而林草地面积总数占该分区的42.91%，表

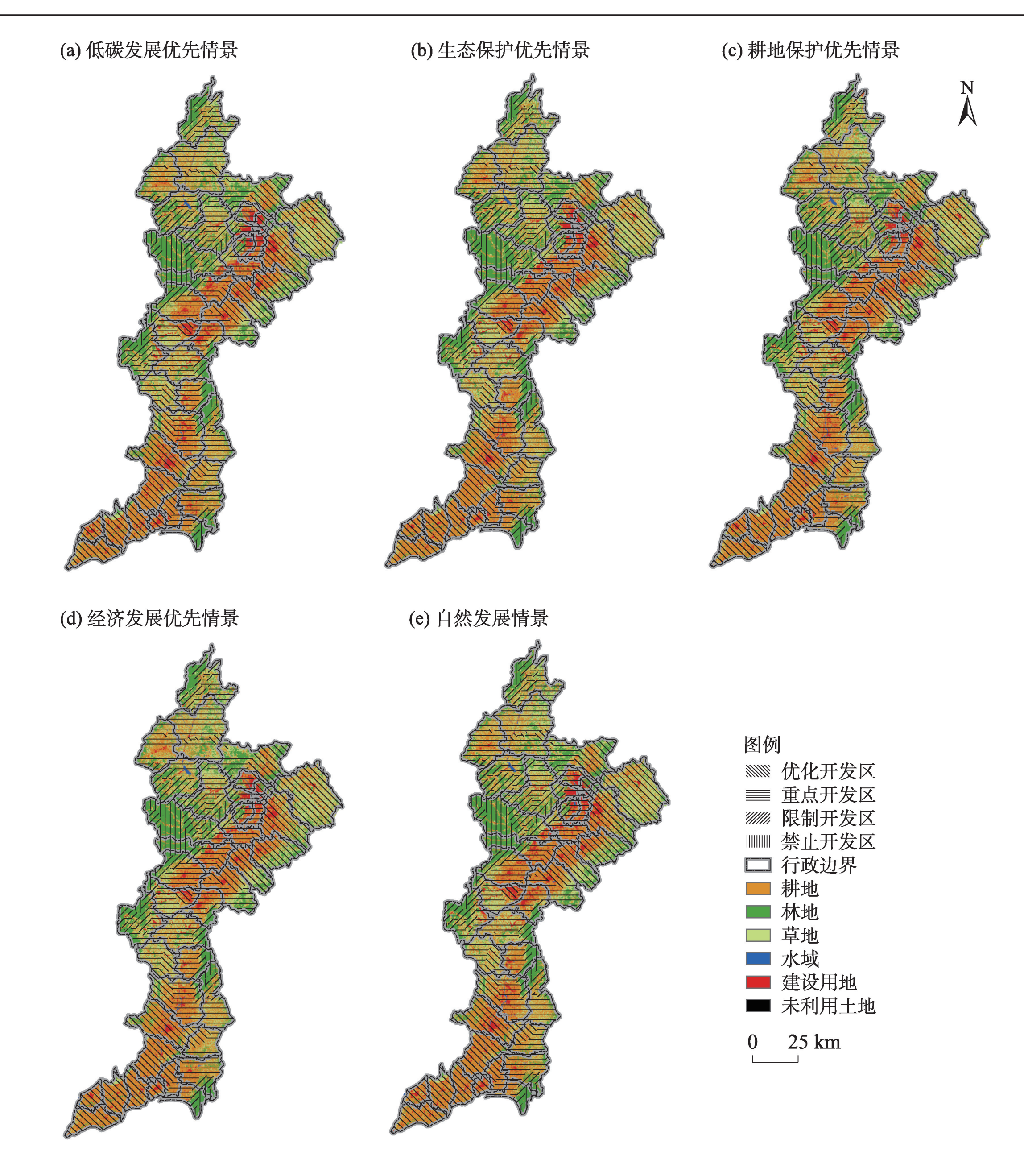


图8　2030年汾河流域多情景土地利用优化分区

Fig. 8　Multi-scenario land use optimization zoning of Fenhe River Basin in 2030

明该区用于生产、生活功能用地的土地后备资源相对充足,可以加大宜耕区域的开发。相对前两个分区,除禁止开发区土地利用类型结构相对合理,限制开发区仍需合理调配用地类型结构。

2.3.5 经济发展优先　总体上流域碳排放量为2686.68×10⁴ t,高于其他情景。相较2020年,建设用地增加1049.54 km²,增长率达到34.29%,为碳排放贡献25.51%,同期耕地、草地缩减面积最大,缩减面积分别为619.48 km²、227.19 km²,缩减率依次达到-4.04%及-2.20%,碳吸收量减少2.34×10⁴ t。重点开发区中占比最高的用地类型为耕地、草地、林地及建设用地,占比依次为:44.68%、29.47%、13.43%及11.51%,整体为碳源,碳排放量贡献占流域的46.08%,优化开发区中主要用地类型与重点开发区近似,碳排放量为1194.65×10⁴ t。同理上述功能分区优化原则,该区草地等生态功能的用地占比相对较高,尤其是重点发展区草地占比位居主要用地类型的第2位,因此,应考虑适当开发宜耕草地,优化其土地利用结构。禁止开发区林草地面积占比之和达到99.39%,碳吸收总量达到10.71×10⁴ t,占流域

碳吸收量的20.80%，土地利用类型结构相对合理。限制开发区耕地及建设用地占比之和占该分区的21.95%，作为生态缓冲区，宜加大退耕还林、还草，促进全域生态功能水平的整体提高。

2.4 汾河流域低碳土地利用优化路径

2030年流域5种情景净碳排放量均高于起始年，按超出程度由高到低为：经济发展优先、自然发展、耕地保护优先、生态保护优先和低碳发展优先，超出量分别为 2666.66×10^4 t、2196.04×10^4 t、2136.75×10^4 t、2098.38×10^4 t、2020.83×10^4 t，未来多情景土地利用演变及净碳排放变化趋势与流域社会经济发展趋势保持一致。各情景横向比较，碳收支水平由高到低为：低碳发展优先、生态保护优先、耕地保护优先、自然发展及经济发展优先。根据2030年社会经济发展需求，建设用地目标规模介于3120.43~4109.92 km^2，当建设用地面积达到3120.43 km^2，林地及草地面积分别为10118.84 km^2、9201.89 km^2，净碳排放量最低，相比其他情景，低碳发展优先情景更利于未来研究区碳收支的优化。按土地利用功能分区及用地结构，未来用地应发挥禁止开发区的固碳碳汇功能，有效提高优化限制开发区林草地占比发挥其生态缓冲区作用，同时合理布局重点及优化开发区耕地、建设用地比例，统筹流域总体碳收支水平，实现未来低碳减排的土地利用布局。

3 结 论

（1）汾河流域禁止、限制、重点及优化开发区4类土地利用功能分区面积分别为2491.76 km^2、6445.99 km^2、16325 km^2、14477 km^2；2020年流域净碳排放量为 2002.46×10^4 t，除禁止开发区为流域碳汇区，碳吸收量为 0.76×10^4 t，其余三区均为碳源区，碳排放量为 2002.23×10^4 t。

（2）2030年各情景土地利用碳收支水平由高到低为：低碳发展优先、生态保护优先、耕地保护优先、自然发展及经济发展优先，净碳排放量为：2666.66×10^4 t、2196.04×10^4 t、2136.75×10^4 t、2098.38×10^4 t、2020.83×10^4 t。

（3）各情景土地利用优化分区除禁止开发区用地结构相对合理，限制开发区仍需适当压缩该区耕地及建设用地比例，重点及优化开发区应考虑适当开发宜耕草地，促进流域土地利用生产、生活、生态功能协调发展，实现低碳土地利用目标。

参考文献(References):

[1] 邓旭, 谢俊, 滕飞. 何谓“碳中和”?[J]. 气候变化研究进展, 2021, 17(1): 107–113. [Deng Xu, Xie Jun, Teng Fei. What is carbon neutrality?[J]. Climate Change Research, 2021, 17(1): 107–113.]

[2] 项目综合报告编写组.《中国长期低碳发展战略与转型路径研究》综合报告[J]. 中国人口·资源与环境, 2020, 30(11): 1–25. [The project comprehensive report compilation group. ‘Research on China’s long-term low-carbon development strategy and transformation path’ comprehensive report[J]. China Population, Resources and Environment, 2020, 30(11): 1–25.]

[3] 王灿, 张雅欣. 碳中和愿景的实现路径与政策体系[J]. 中国环境管理, 2020, 12(6): 58–64. [Wang Can, Zhang Yaxin. Implementation pathway and policy system of carbon neutrality vision[J]. Chinese Journal of Environmental Management, 2020, 12(6): 58–64.]

[4] 周宏春, 史作廷. 双碳导向下的绿色消费: 内涵、传导机制和对策建议[J]. 中国科学院院刊, 2022, 37(2): 188–196. [Zhou Hongchun, Shi Zuoting. Green consumption under carbon-orientated: Connotation, transmission mechanism and countermeasures[J]. Bulletin of Chinese Academy of Sciences, 2022, 37(2): 188–196.]

[5] 余碧莹, 赵光普, 安润颖, 等. 碳中和目标下中国碳排放路径研究[J]. 北京理工大学学报(社会科学版), 2021, 23(2): 17–24. [Yu Biying, Zhao Guangpu, An Runying, et al. Research on China’s CO_2 emission pathway under carbon neutral target[J]. Journal of Beijing Institute of Technology(Social Sciences Edition), 2021, 23(2): 17–24.]

[6] 杨皓然, 吴群. 不同政策方案下的南京市土地利用碳排放动态模拟[J]. 地域研究与开发, 2021, 40(3): 121–126. [Yang Haoran, Wu Qun. Dynamic simulation of carbon emissions from land use in Nanjing City under different policy scenarios[J]. Areal Research and Development, 2021, 40(3): 121–126.]

[7] 赵宏波, 魏甲晨, 孙东琪, 等. 基于随机森林模型的“生产–生活–生态”空间识别及时空演变分析——以郑州市为例[J]. 地理研究, 2021, 40(4): 945–957. [Zhao Hongbo, Wei Jiachen, Sun Dongqi, et al. Recognition and spatio-temporal evolution analysis of production-living-ecological spaces based on the random forest model: A case study of Zhengzhou City, China[J]. Geographical Research, 2021, 40(4): 945–957.]

[8] 陈万旭, 李江风, 曾杰, 等. 中国土地利用变化生态环境效应的空间分异性与形成机理[J]. 地理研究, 2019, 38(9): 2173–2187. [Chen Wanxu, Li Jiangfeng, Zeng Jie, et al. Spatial heterogeneity and formation mechanism of eco-environmental effect of land use change in China[J]. Geographical Research, 2019, 38(9): 2173–2187.]

[9] 袁利, 刘毅华, 邱坚坚. 经济与生态效益不同情景下的广州市土地利用优化配置[J]. 生态经济, 2021, 37(4): 103–109. [Yuan Li, Liu Yihua, Qiu Jianjian. An optimal allocation analysis of land use under different scenarios with economic and ecological benefits in Guangzhou[J]. Ecological Economy, 2021, 37(4): 103–109.]

[10] 涂小松, 濮励杰, 严祥, 等. 土地资源优化配置与土壤质量调控的系统动力学分析[J]. 环境科学研究, 2009, 22(2): 221–226. [Tu

Xiaosong, Pu Lijie, Yan Xiang, et al. Analysis of optimal allocation of land resources and soil quality regulation using system dynamics[J]. Research of Environmental Sciences, 2009, 22(2): 221-226.]

[11] 魏伟, 颉耀文, 魏晓旭, 等. 基于CLUE-S模型和生态安全格局的石羊河流域土地利用优化配置[J]. 武汉大学学报(信息科学版), 2017, 42(9): 1306-1315. [Wei Wei, Xie Yaowen, Wei Xiaoxu, et al. Land use optimization based on CLUE-S model and ecology security scenario in Shiyang River Basin[J]. Geomatics and Information Science of Wuhan University, 2017, 42(9): 1306-1315.]

[12] 王帝文, 李飞雪, 陈东. 基于Pareto最优和多目标粒子群的土地利用优化配置研究[J]. 长江流域资源与环境, 2019, 28(9): 2019-2029. [Wang Diwen, Li Feixue, Chen Dong. Research on optimal land use allocation based on pareto optimal and multi-particle swarm algorithm[J]. Resources and Environment in the Yangtze Basin, 2019, 28(9): 2019-2029.]

[13] 彭玉玲, 徐学娴, 隗剑秋, 等. 老挝凯山丰威汉市土地资源的空间优化配置[J]. 水土保持通报, 2021, 41(5): 160-165, 373. [Peng Yuling, Xu Xuexian, Yu Jianqiu, et al. Spatial optimal allocation of land resources in Fengweihan City, Kaishan, Laos[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(5): 160-165, 373.]

[14] 管成文. 基于CLUE-S模型和生态敏感性分析的江川区土地利用空间格局优化配置[D]. 昆明: 云南大学, 2018. [Guan Chengwen. Optimal Allocation of Land Use Spatial Pattern in Jiangchuan Area Based on CLUE-S Model and Ecological Sensitivity Analysis[D]. Kunming: Yunnan University, 2018.]

[15] 马冰滢, 黄姣, 李双成. 基于生态-经济权衡的京津冀城市群土地利用优化配置[J]. 地理科学进展, 2019, 38(1): 26-37. [Ma Bingying, Huang Jiao, Li Shuangcheng. Optimal allocation of land use types in the Beijing-Tianjin-Hebei urban agglomeration based on ecological and economic benefits trade-offs[J]. Progress in Geography, 2019, 38(1): 26-37.]

[16] 陈红, 史云扬, 柯新利, 等. 生态与经济协调目标下的郑州市土地利用空间优化配置[J]. 资源科学, 2019, 41(4): 717-728. [Chen Hong, Shi Yunyang, Ke Xinli, et al. Spatial optimization of land use based on the objective of coordinated ecological protection and economic development in Zhengzhou City[J]. Resources Science, 2019, 41(4): 717-728.]

[17] 魏伟, 石培基, 周俊菊, 等. 基于生态安全格局的干旱内陆河流域土地利用优化配置分区[J]. 农业工程学报, 2016, 32(18): 9-18. [Wei Wei, Shi Peiji, Zhou Junju, et al. Configuration partition of land use optimization in arid inland river basin based on ecological security pattern[J]. Transactions of the Chinese Society of Agricultural Engineering, 2016, 32(18): 9-18.]

[18] Zhang X J, Wang G Q, Xue B L, et al. Dynamic landscapes and the driving forces in the Yellow River Delta wetland region in the past four decades[J]. Science of the Total Environment, 2021, 787: DOI: 10.1016/j.scitotenv.2021.147644.

[19] Liu X P, Liang X, Li X, et al. A future land use simulation model (FLUS) for simulating multiple land use scenarios by coupling human and natural effects[J]. Landscape & Urban Planning, 2017, 168: 94-116.

[20] 齐麟, 许东, 朱琪, 等. 基于GeoSOS-FLUS平台的东北森林屏障带生态格局优化[J]. 生态学杂志, 2021, 40(11): 3448-3462. [Qi Lin, Xu Dong, Zhu Qi, et al. Ecological pattern optimization of forest barrier belt in Northeast China based on GeoSOS-FLUS[J]. Chinese Journal of Ecology, 2021, 40(11): 3448-3462.]

[21] 苏迎庆, 刘庚, 赵景波, 等. 基于FLUS模型的汾河流域生态空间多情景模拟预测[J]. 干旱区研究, 2021, 38(4): 1152-1161. [Su Yingqing, Liu Geng, Zhao Jingbo, et al. Multi-scenario simulation prediction of ecological space in Fenhe River Basin based on FLUS model[J]. Arid Zone Research, 2021, 38(4): 1152-1161.]

[22] 景艳宾, 孙旭, 刘军, 等. 基于MCR模型的内蒙古鄂托克旗生态廊道构建[J]. 水土保持通报, 2021, 41(2): 170-177. [Jing Yanbin, Sun Xu, Liu Jun, et al. Construction of ecological corridorin Etuoke Banner of Inner Mongolian based on MCR model[J]. Bulletin of Soil and Water Conservation, 2021, 41(2): 170-177.]

[23] 刘海龙, 王炜桥, 王跃飞, 等. 汾河流域生态敏感性综合评价及时空演变特征[J]. 生态学报, 2021, 41(10): 3952-3964. [Liu Hailong, Wang Weiqiao, Wang Yuefei, et al. Comprehensive evaluation of the ecological sensitivity and the characteristics of temporal and spatial variations in Fenhe River Basin[J]. Acta Ecologica Sinica, 2021, 41(10): 3952-3964.]

[24] 陈南南, 康帅直, 赵永华, 等. 基于MSPA和MCR模型的秦岭(陕西段)山地生态网络构建[J]. 应用生态学报, 2021, 32(5): 1545-1553. [Chen Nannan, Kang Shuaizhi, Zhao Yonghua, et al. Construction of ecological network in Qinling Mountains of Shaanxi, China based on MSPA and MCR model[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2021, 32(5): 1545-1553.]

[25] 钟式玉, 吴箐, 李宇, 等. 基于最小累积阻力模型的城镇土地空间重构——以广州市新塘镇为例[J]. 应用生态学报, 2012, 23(11): 3173-3179. [Zhong Shiyu, Wu Qing, Li Yu, et al. Reconstruction of urban land space based on minimum cumulative resistance model: A case study of Xintang Town, Guangzhou City[J]. Chinese Journal of Applied Ecology, 2012, 23(11): 3173-3179.]

[26] 林伊琳, 赵俊三, 陈国平, 等. 基于MCR-FLUS-Markov模型的区域国土空间格局优化[J]. 农业机械学报, 2021, 52(4): 159-170, 207. [Lin Yilin, Zhao Junsan, Chen Guoping, et al. Optimization of regional territory space pattern based on MCR-FLUS-Markov model[J]. Transactions of the Chinese Society for Agricultural Machinery, 2021, 52(4): 159-170, 207.]

[27] 刘敏, 郝炜. 山西省国家A级旅游景区空间分布影响因素研究[J]. 地理学报, 2020, 75(4): 878-888. [Liu Min, Hao Wei. Spatial distribution and its influencing factors of national A-level tourist attractions in Shanxi Province[J]. Acta Geographica Sinica, 2020, 75(4): 878-888.]

[28] 郑洋, 郝润梅, 吴晓光, 等. 基于MCR模型的村庄"三生空间"格局优化研究[J]. 水土保持研究, 2021, 28(5): 362-367. [Zheng Yang, Hao Runmei, Wu Xiaoguang, et al. Research on the space pattern optimization of production-living-ecology spacesin village based on MCR model[J]. Research of Soil and Water Conservation, 2021, 28(5): 362-367.]

[29] 刘孝富, 舒俭民, 张林波. 最小累积阻力模型在城市土地生态适宜性评价中的应用——以厦门为例[J]. 生态学报, 2010, 30(2): 421-428. [Liu Xiaofu, Shu Jianmin, Zhang Linbo. Research on ap-

plying minimal cumulative resistance model in urban land ecological suitability assessment: As an example of Xiamen City[J]. Acta Ecologica Sinica, 2010, 30(2): 421–428.]

[30] 张杰, 陈海, 刘迪, 等. 基于县域尺度土地利用碳排放的时空分异及影响因素研究[J]. 西北大学学报(自然科学版), 2022, 52(1): 21–31. [Zhang Jie, Chen Hai, Liu Di, et al. The spatial and temporal variation and influencing factors of land use carbon emissions at county scale[J]. Journal of Northwest University(Natural Science Edition), 2022, 52(1): 21–31.]

[31] 朱向梅, 王子莎. 黄河流域碳水足迹评价及时空格局研究[J]. 环境科学与技术, 2020, 43(10): 200–211. [Zhu Xiangmei, Wang Zisha. Study on the assessment of carbon and water footprint and its spatial-temporal pattern in the Yellow River Basin[J]. Environmental Science & Technology, 2020, 43(10): 200–211.]

[32] 周嘉, 王钰萱, 刘学荣, 等. 基于土地利用变化的中国省域碳排放时空差异及碳补偿研究[J]. 地理科学, 2019, 39(12): 1955–1961. [Zhou Jia, Wang Yuxuan, Liu Xuerong, et al. Spatial temporal differences of carbon emissions and carbon compensation in China based on land use change[J]. Scientia Geographica Sinica, 2019, 39(12): 1955–1961.]

[33] 禹康康, 王延华, 孙恬, 等. 太湖流域土地利用碳排放变化及其预测[J]. 土壤, 2022, 54(2): 406–414. [Yu Kangkang, Wang Yanhua, Sun Tian, et al. Changes and prediction of carbon emission from different land use types in Taihu Lake Basin[J]. Soils, 2022, 54(2): 406–414.]

Optimization of low-carbon land use pattern based on scenario simulation: A case study of Fenhe River Basin

ZHANG Enyue[1], ZHENG Junyan[2], SU Yingqing[3], ZHANG Lei[4], ZHANG Pengfei[1], LIU Geng[1]

(1. College of Geography Science, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China; 2. Zhongjin Environmental Technology Co., Ltd, Taiyuan 030000, Shanxi, China; 3. College of Geography and Environmental Science, Northwest Normal University, Lanzhou 730070, Gansu, China; 4. School of Economics and Management, Taiyuan Normal University, Jinzhong 030619, Shanxi, China)

Abstract: Carrying out the optimal allocation of land use is aimed at promoting the scientific use of regional land resources and achieving carbon emission reduction targets. In this paper, the Fenhe River Basin is taken as the research area. Based on the data on land use and resistance factors in 2015 and 2020, the FLUS-MCR model and the carbon budget coefficient method are used to verify the accuracy of the model. Five simulation scenarios, such as low-carbon development priority, economic development priority, cultivated land protection priority, ecological protection priority, and natural development in 2030, are set up to compare the layout characteristics of land use types under different scenarios in the future, and an optimized layout scheme is proposed. The results showed that: (1) In 2020, the areas of four land use functional zoning of the prohibited, restricted, key, and optimized development zones in Fenhe River Basin were 2491.76 km^2, 6445.99 km^2, 16325 km^2, and 14477 km^2, respectively. The net carbon emission of the basin is 2002.46×10^4 t. The prohibited development zone is the carbon sink area of the basin, and the total carbon absorption is 0.76×10^4 t. The remaining three areas are carbon source areas, and the total carbon emission is 2003.22×10^4 t. (2) In 2030, the carbon balance of land use in each scenario from high to low is low-carbon development priority, ecological protection priority, cultivated land protection priority, natural development priority, and economic development priority. (3) In 2030, under different scenarios, in addition to the relatively reasonable land use structure of the prohibited development zone, the restricted development zone still needs to appropriately reduce the proportion of cultivated land and construction land in the area. To support the coordinated development of land use, production, living conditions, and ecological functions and to accomplish low-carbon land use goals, the key and optimal development zones should take arable grassland development into consideration.

Keywords: low-carbon land use; optimize configuration; FLUS-MCR model; carbon budget coefficient; Fenhe River Basin; Shanxi